

# Concretos sustentables expuestos a altas temperaturas

Jesús Fernando López-Perales<sup>A</sup>, Rodrigo Puente-Ornelas<sup>A</sup>,  
María Cruz Alonso-Alonso<sup>B</sup>, Ana María Guzmán Hernández<sup>A</sup>,  
Herlinda María Delgadillo-Guerra<sup>A</sup>, Alejandro Trujillo-Álvarez<sup>A</sup>

<sup>A</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León, FIME-CIDET

<sup>B</sup> Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC).

ropuor@gmail.com

## RESUMEN

*Concretos fueron elaborados reemplazando cemento Portland ordinario por nano-SiO<sub>2</sub> geotérmica y humo de sílice. Se curaron a 20°C y 100% de humedad hasta 7 años y después fueron expuestos a altas temperaturas (350°C, 550°C y 750°C). Se les evaluó la velocidad de ultrasonidos (UPV), análisis termogravimétrico/diferencial (TG/DTA), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB). La pérdida de peso y la reducción en la UPV fue mayor para los especímenes adicionados (NSG y HS) en comparación con el espécimen de referencia (CPC 100%), además se apreció una mayor degradación en la microestructura de los especímenes con adiciones.*

## PALABRAS CLAVE

Resistencia al fuego, concretos, caliza, nano- SiO<sub>2</sub>, microestructura.

## ABSTRACT

*Concretes were fabricated replacing ordinary Portland cement by geothermal nano-SiO<sub>2</sub> and silica fume. Were cured at 20°C and 100% humidity for 7 years and before were expoused at higt temperatures (350°C, 550°C y 750°C). They evaluated the ultrasonic pulse velocity (UPV), analysis thermogravimetric/differential (ATG/ATD), X ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM). Weight loss and reduction in the UPV was higher for specimens additioned (GNS and SF) compared to the reference specimen (CPC 100%), also, a high degradation was observed in the microstructure of the specimens with additions.*

## KEYWORDS

Fire exposure, concretes, limestone, nano-SiO<sub>2</sub>, microstructure.

## INTRODUCCIÓN

En general, el concreto es considerado como un material que presenta un buen comportamiento cuando es sometido a altas temperaturas, debido a que no sufre procesos de combustión o ignición además de ser mal conductor térmico, por lo que el calor tarda un tiempo considerable en alcanzar cierta

profundidad. Sin embargo, durante su vida en servicio y por factores que pueden ser de carácter accidental o de diseño, el concreto se puede ver sometido a altas temperaturas, lo que ocasiona una serie de alteraciones en la estructura interna del concreto (cambios físico-químicos) que afectan sus propiedades, como disminución en la resistencia a compresión y módulo de elasticidad, además de presentar agrietamiento y cambios de color en la superficie.<sup>1,2</sup>

El daño que se produce en el concreto dependerá principalmente de la velocidad de calentamiento, la temperatura máxima alcanzada, del tiempo de exposición, de las condiciones de enfriamiento y de las propiedades de los materiales con las que fue elaborado, como son los agregados, tipo de cemento, adiciones suplementarias, agua y aditivos químicos.<sup>3-5</sup>

En el tenor de las adiciones suplementarias, la utilización de los residuos industriales como sustitutos parciales de cemento, es una práctica que se ha vuelto muy común alrededor del mundo, principalmente por los beneficios que se obtienen como son el incremento en las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto, reducción en el costo de fabricación y reducción en el impacto ambiental al emitir menor cantidad de gases de efecto invernadero.<sup>6</sup>

En diversas investigaciones se ha encontrado que la resistencia del concreto expuesto a altas temperaturas se puede mejorar mediante la sustitución parcial de cemento Portland por residuos industriales como son la ceniza volante, humo de sílice, escoria de alto horno, metacaolín, por citar algunos.<sup>7-8</sup>

Xu y colaboradores estudiaron concretos de resistencia normal con adiciones de hasta 55% de ceniza volante, encontrando que el concreto adicionado con ceniza volante mejora la resistencia del concreto a altas temperaturas en comparación con el concreto de referencia elaborado únicamente con CPO.<sup>9</sup> Saad y colaboradores realizaron investigaciones en concretos con adiciones de humo de sílice de 10%, 20% y 30% sometidos a temperaturas de hasta 600°C, encontrando que el espécimen con adición de 10% de humo de sílice presenta el mejor comportamiento en relación a resistencia a compresión residual a las diferentes temperaturas.<sup>10</sup>

El cambio volumétrico producto de la transformación del  $\text{Ca(OH)}_2$  en  $\text{CaO}$  y  $\text{H}_2\text{O}$  y su posterior rehidratación, es uno de los fenómenos que produce agrietamiento y el debilitamiento del concreto sometido a altas temperaturas, por tanto, el incremento en la resistencia de este tipo de concretos adicionados con materiales cementantes suplementarios se atribuye a que éstos, por su actividad puzolánica consumen la portlandita y se traduce en un menor agrietamiento y daño en la microestructura.<sup>11</sup>

Por otra parte, debido a su tamaño de partícula, el humo de sílice es un material muy utilizado con el fin de producir concretos de alta resistencia, y es este tipo de concretos quien presenta una mayor tendencia a experimentar desprendimiento explosivo, lo cual ocurre debido al tamaño de partícula y la actividad puzolánica del humo de sílice resultando en una matriz cementante más densa, reduciendo la porosidad y permeabilidad del concreto y limitando la capacidad del mismo de remover el vapor creado lo que ocasiona altas presiones y un mayor daño que en el concreto de resistencia normal.<sup>12</sup>

Por otro lado, existen escasas investigaciones en las cuales se compara el efecto que produce la nanosílice y el humo de sílice en concretos que son expuestos a altas temperaturas. Morteza y colaboradores en su investigación estudiaron el efecto de las altas temperaturas sobre la resistencia a compresión y tensión de concretos de alta resistencia con adiciones de nanosílice y humo de sílice. Ellos concluyeron que la nanosílice incrementa la resistencia a compresión y tensión residual, mientras que el astillamiento (*spalling*) y la pérdida de peso disminuyen a medida que la permeabilidad aumenta.<sup>13</sup>

En México, las plantas geotérmicas son utilizadas para producir electricidad de bajo costo, sin embargo, también generan un residuo compuesto principalmente por partículas de tamaño nanométrico (~40nm) de sílice amorfa como algunas impurezas como cloruros de sodio y potasio. En investigaciones previas, se ha estudiado el residuo nanosílice geotérmica (NSG) en la elaboración de pastas de cemento, morteros, concretos y geopolímeros, encontrando que se trata de un material promisorio como sustituto parcial de cemento Portland ya que debido a su actividad puzolánica, incrementa las propiedades mecánicas y de durabilidad siendo sus beneficios comparables con los obtenidos al adicionar humo de sílice, por lo tanto el estudio de este residuo industrial como sustituto de cemento Portland se sigue investigando.<sup>14-15</sup>

Con el fin de incrementar los conocimientos acerca del comportamiento de este residuo industrial cuando es adicionado en un concreto, la presente investigación tiene por objetivo estudiar el efecto de la adición de residuo nanosílice geotérmica y humo de sílice en concretos base cemento Portland sometidos a altas temperaturas. El daño en la microestructura del concreto se evaluó mediante velocidad de ultrasonidos (VU), análisis termogravimétrico diferencial (ATD), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB).

## EXPERIMENTACIÓN

### Materias primas

La nanosílice geotérmica proveniente de la planta geotérmica Cerro Prieto (localizada en Baja California, México) fue lavada en agua a 100°C debido a que ésta contiene altas concentraciones de cloruro de sodio y potasio. El lavado fue realizado con el fin de obtener las concentraciones deseadas de cloruros totales, 0% en peso de Cl<sup>-</sup> con respecto al peso del cemento, el cual fue determinado mediante titulación volumétrica utilizando el método de Mohr. Después del lavado, la NSG fue secada por un lapso de 24 h a 120°C en un horno eléctrico; posteriormente la NSG fue tamizada hasta obtener partículas con tamaño menor a 75 µm y finalmente fue homogeneizada.

La NSG, el HS y el CPC utilizados en esta investigación fueron caracterizados mediante fluorescencia de rayos X. Además, se determinó su densidad utilizando el método de Le Chatelier de acuerdo a las especificaciones que marca la norma ASTM C-188, el área superficial se determinó utilizando la técnica de absorción de nitrógeno junto con el método de análisis BET.

La tabla I muestra la composición química de los materiales cementantes utilizados en la elaboración de los especímenes de concreto.

Tabla I.- Composición química de los materiales cementantes vía FRX (% peso)												
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	PI	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Área BET (m <sup>2</sup> /g)
CPC	18.51	4.46	2.61	67.45	1.27	3.26	0.36	0.87	-	0.79	3.03	0.88
HS	95.89	0.42	1.22	0.61	0.42	0.45	0.17	0.82	-	0.29	2.20	24.66
NSG	98.36	0.009	0.04	0.45	-	0.03	0.32	0.23	0.06	0.31	2.04	8.56

### Elaboración de especímenes y dosificación de mezclas

Los especímenes de concreto fueron elaborados utilizando moldes cilíndricos de dimensiones 50 x 100 mm, cemento Portland compuesto (CPC 30R) de acuerdo al criterio que marca la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE, grava (19 mm), arena (4.75 mm), residuo nanosílice geotérmica (NSG), humo de sílice (HS), agua destilada y superplastificante comercial Glenium 3150 base policarboxilato, utilizando una relación agua/cementantes de 0.5 y niveles de reemplazo de cemento Portland por NSG y HS de 0%, 20% y 30%.

Los especímenes fueron curados por 7 años y después de ese tiempo, se determinó su peso, y se caracterizaron mediante UPV, ATD, DRX y MEB-EDS. Las mediciones de velocidad de ultrasonidos se realizaron de acuerdo a la normativa europea UNE-EN 12504-4. La designación y dosificación de los especímenes se muestran en la tabla II.

Tabla II. Designación y proporción de mezclas			
Mezcla	Proporciones de Materiales		
	Cemento	Adición	R a/c
CPC100	100%	0%	0.5
CPC80/GNW20	80%	20%	0.5
CPC70/GNW30	70%	30%	0.5
CPC70/SF30	70%	30%	0.5

### Régimen de calentamiento

Los especímenes de concreto fueron sometidos a un régimen de calentamiento lento. La velocidad de calentamiento se programó a 1°C/min comenzando desde temperatura ambiente hasta alcanzar las diferentes temperaturas críticas (T<sub>c</sub>); la T<sub>c</sub> se mantuvo constante por un lapso de 2 h para permitir la homogeneización de todos los especímenes y posteriormente, se dejaron enfriar a una velocidad menor a 1°C/min dentro del horno eléctrico con la puerta cerrada. Las temperaturas críticas que se programaron en el horno eléctrico fueron: 350°C, 550°C y 750°C.

### Caracterización de los especímenes de concreto

Después de someter los especímenes al régimen de calentamiento, se determinó el peso y la velocidad de ultrasonidos con el fin de comparar los

valores iniciales con aquellos obtenidos después de ser sometidos a las diferentes temperaturas críticas. Los análisis termogravimétricos se llevaron a cabo tomando muestra de la parte central de los especímenes iniciales y después del régimen de calentamiento; la muestra fue molida en mortero hasta convertirla en polvo. Las condiciones de trabajo fueron: atmósfera de nitrógeno, crisol de alúmina, muestra de entre 30~40 mg y una velocidad de calentamiento de 25°C a 1000°C a una tasa de 10°C/min. El equipo utilizado para el ATD fue un SDT Q600. La identificación de las fases cristalinas se realizó mediante el método de análisis de polvos por difracción de rayos X (DRX) utilizando un equipo Bruker D8-ADVANCE. La pasta de cemento previamente acondicionada (impregnación en resina epoxi, corte y pulido) fue estudiada mediante microscopía electrónica de barrido en su modalidad de electrones retrodispersados para analizar el efecto que ocasionan las altas temperaturas en la microestructura de los especímenes. El equipo utilizado fue un S-4800 Scanning Electron Microscope y Bruker X-Flash Detector 5030.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Pérdida de peso y velocidad de ultrasonidos (UPV)

La figura 1 muestra el porcentaje de pérdida de peso de los especímenes que fueron sometidos a las diferentes temperaturas críticas.

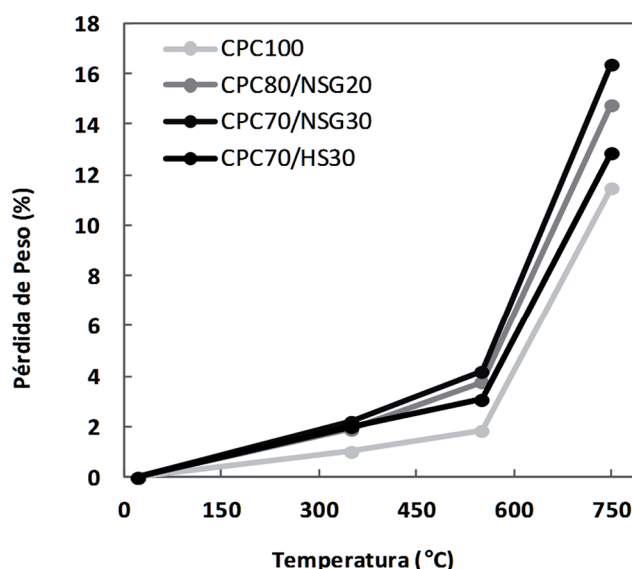


Fig. 1. Pérdida de peso a diferentes Tc.

Es posible apreciar que la pérdida de peso se incrementa a medida que aumenta la temperatura de exposición. La pérdida de peso es relativamente baja cuando las muestras se expusieron a 350°C y 550°C; por otra parte, cuando los especímenes se expusieron a 750°C, el porcentaje de pérdida de peso se incrementó de manera significativa. Como se puede observar, la pérdida de peso es mayor para los especímenes adicionados con NSG y HS en comparación con el espécimen de referencia (CPC). Esto puede atribuirse a que tanto la NSG como el HS producen una matriz cementante más densa, por lo que la porosidad se reduce y existe menor permeabilidad, limitando la capacidad de eliminar el

vapor creado por la evacuación del agua libre en los poros y la deshidratación de la pasta de cemento, lo que provoca altas presiones y un mayor daño en comparación con el daño que presenta el espécimen de referencia (sin adiciones); lo anterior se pudo comprobar mediante los análisis termogravimétricos.

Los porcentajes de pérdida de peso son comparables con los encontrados por Morteza en su investigación donde para la temperatura de 400°C, la pérdida de peso fue de 3-4% y 12-18% para la temperatura de 800°C.<sup>13</sup> A 350°C y 550°C la aparición de grietas es mínima, pudiendo relacionarse con los porcentajes de pérdida de peso, lo cual está en acuerdo con el estudio realizado por Omer en donde la aparición de grietas y cambios de color significantes se encuentran a temperaturas por encima de 600°C.<sup>1, 16</sup> El agrietamiento de los especímenes es considerado como resultado de la evaporación del agua y la presión del vapor, la contracción de la pasta de cemento y la expansión de volumen que experimenta la transformación del compuesto químico  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en  $\text{CaO}$ , como lo reporta Lin y colaboradores.<sup>17</sup>

La figura 2 muestra los valores de la velocidad de ultrasonidos relativa  $[\text{UPV}(\text{Tc})/\text{UPV}(22^\circ\text{C})]$ . Podemos apreciar que la velocidad de ultrasonidos disminuye gradualmente a medida que la temperatura aumenta, esta reducción es mayor para los especímenes adicionados en comparación con el espécimen de referencia.<sup>18</sup> Esto es atribuido a la actividad puzolánica que presentan la NSG y el HS como se discutió anteriormente. A medida que la cantidad de reemplazo de NSG aumenta, la velocidad de ultrasonidos se reduce en mayor porcentaje. En algunas investigaciones se ha encontrado que la adición de HS mejora las propiedades físicas y mecánicas del concreto cuando es expuesto a altas temperaturas.

Esto ocurre cuando el HS es adicionado en porcentajes de 10-15%, sin embargo, el espécimen adicionado con HS de nuestra investigación mostró un peor desempeño en comparación con el espécimen de referencia cuando se

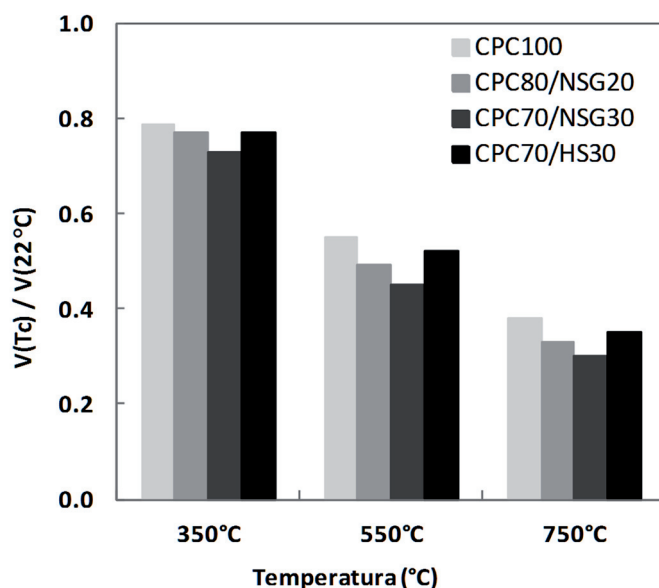


Fig. 2. Velocidad de Ultrasonidos Relativa.

sometió a altas temperaturas, lo cual está en acuerdo con el estudio realizado por Saad y colaboradores en el que encuentran que la estabilidad térmica del concreto adicionado con humo de sílice, disminuye cuando se adicionan porcentajes mayores de HS (20-30%), como ocurrió en este estudio.<sup>19</sup>

### Análisis Termogravimétrico Diferencial (ATD)

El perfil de ATD mostrado en la figura 3 permite identificar las reacciones típicas que ocurren en la muestra de referencia CPC100. A temperaturas por debajo de 100°C la pérdida de peso que ocurre se relaciona a la pérdida de agua evaporable y agua capilar contenida en los poros. En la región de 100°C a 400°C se observa una pérdida de peso constante la cual se relaciona a la deshidratación del gel CSH, como ha sido reportado en muchas investigaciones. En la región de 400°C a 450°C es posible apreciar la pérdida de peso correspondiente a la deshidratación de la portlandita en CaO y agua. A partir de 630°C, se aprecia una intensa pérdida de peso relacionada a la transformación del  $\text{CaCO}_3$  proveniente de los agregados.<sup>20</sup>

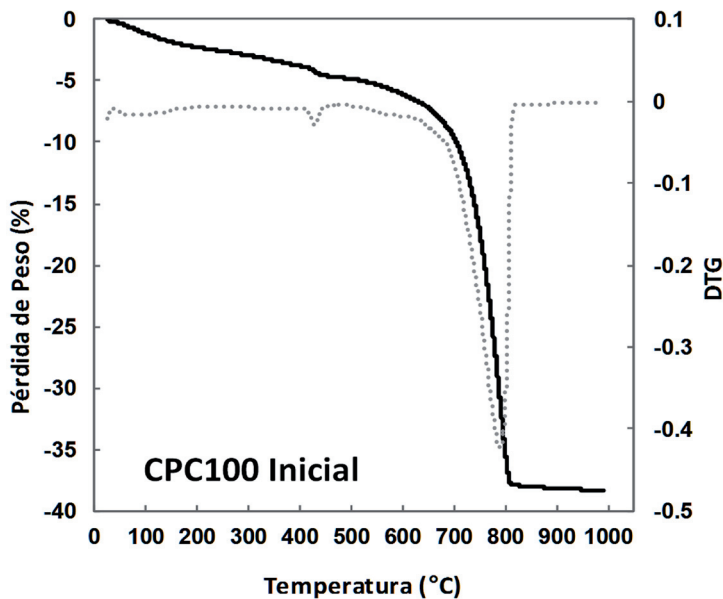


Fig. 3. Perfil ATD/DTG CPC100.

La figura 4 muestra la pérdida de peso de los especímenes iniciales; si consideramos que entre 200°C y 350°C comienza la deshidratación del gel CSH, podemos observar que esta pérdida es mayor para los especímenes adicionados comparados con el espécimen de referencia, esto se debe a que los especímenes adicionados producen mayores cantidades de gel CSH debido a la actividad puzolánica de la NSG y el HS. Además, se aprecia como la curva presenta una caída más pronunciada de pérdida de peso a 400°C para el espécimen adicionado con NSG en comparación con el adicionado con HS. Esto se atribuye a que la NSG, debido a su tamaño de partícula nanométrico, exhibe una mayor actividad puzolánica formando mayores cantidades de gel CSH, lo cual se ve reflejado en la mayor pérdida de peso.



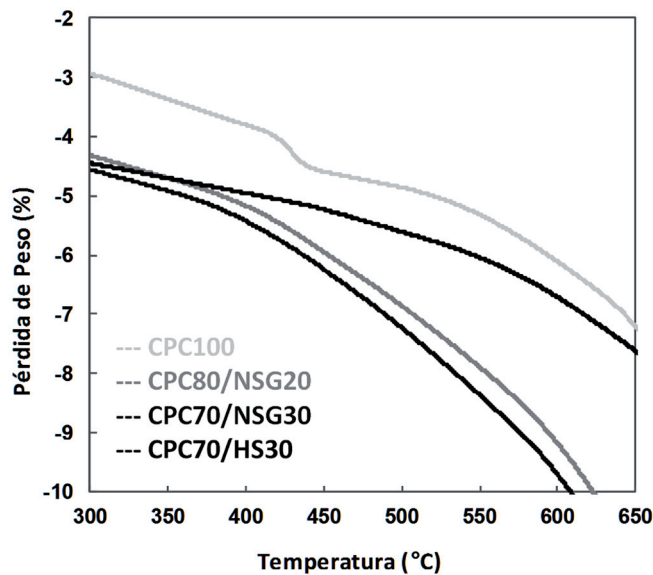


Fig. 4.- Perfil ATD especímenes iniciales.

El DTG de la figura 5 muestra como el pico correspondiente a la portlandita (400°C a 450°C) se observa para la muestra inicial y para la muestra sometida a la temperatura crítica de 350°C. Este pico desaparece cuando la muestra alcanza la temperatura de 550°C, sin embargo, a 750°C puede observarse de nuevo este pico pero desplazado a la izquierda de la gráfica, lo que sugiere que esta portlandita se formó durante la etapa de enfriamiento y por lo tanto es menos cristalina y se descompone a menores temperaturas, como también lo sugieren algunos autores.<sup>20-22</sup>

La figura 6 muestra el DTG de la muestra CPC80/NSG20 inicial y después de ser sometida a las diferentes temperaturas críticas, donde es posible observar

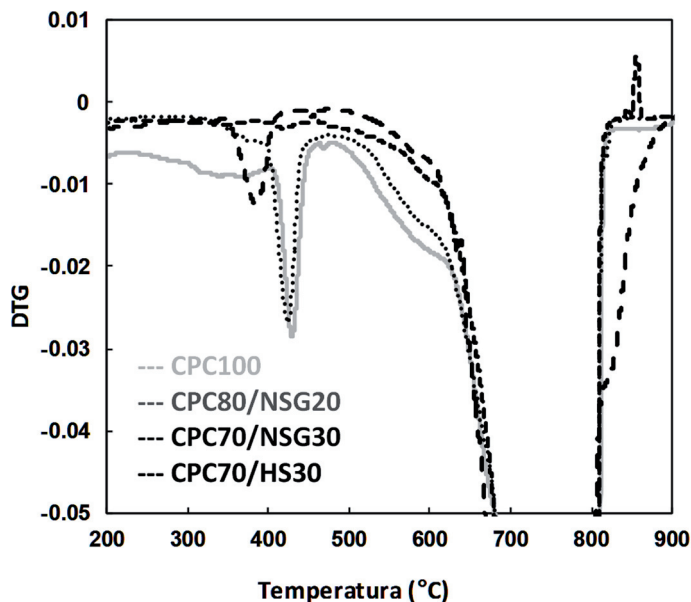


Fig. 5. DTG CPC100 a diferentes Tc.



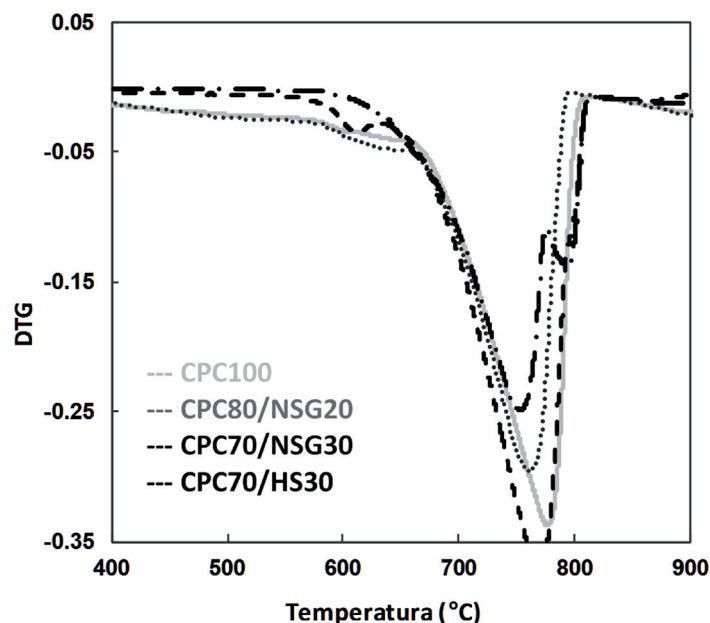


Fig. 6. DTG CPC80/NSG20 a diferentes Tc.

como el pico correspondiente a la transformación del  $\text{CaCO}_3$  en  $\text{CaO}$  y  $\text{CO}_2$  se desplaza ligeramente a la izquierda de la gráfica comparada con la muestra inicial. Además, se pudo apreciar un segundo pico en la muestra sometida a  $750^\circ\text{C}$ , lo que sugiere que se formó durante la etapa de enfriamiento con el  $\text{CO}_2$  que se encontraba dentro del horno y por lo tanto es menos cristalino y se descompone a temperaturas menores como sugieren algunos autores.<sup>20,23</sup>

### Difracción de rayos X (DRX)

La figura 7 muestra el patrón de difracción de la muestra CPC100 inicial y después de ser sometida a las diferentes temperaturas críticas. Las reflexiones típicas asociadas a la portlandita, calcita, cuarzo, dolomita y gel tobermorita fueron encontradas e identificadas. Los difractogramas de la muestra inicial y de la muestra sometida a  $350^\circ\text{C}$  son muy similares, lo que confirma que las fases cristalinas detectadas no sufren transformaciones cuando la muestra se

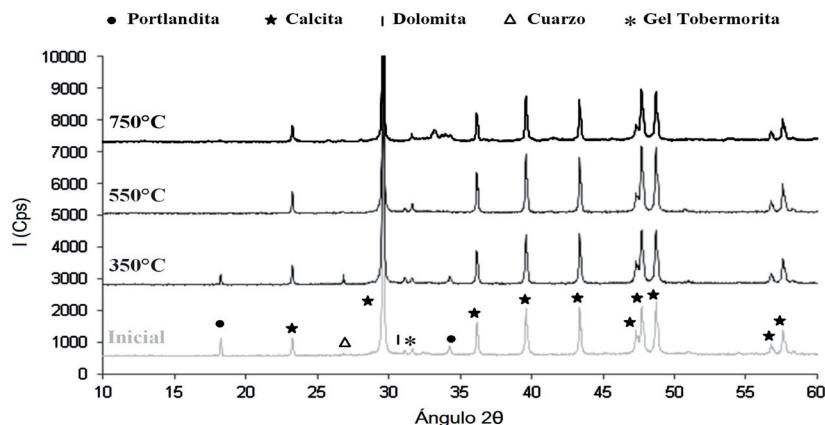


Fig. 7. Difractograma espécimen CPC100 inicial y a diferentes Tc.

somete a 350°C. Se observa como en la muestra inicial y a 350°C, se encuentra el pico relacionado a la portlandita, sin embargo éste desaparece cuando se alcanza la temperatura de 550°C, lo cual está en acuerdo con los resultados del análisis termogravimétrico de la figura 5. Por otra parte, en el DTG de dicha figura se aprecia a 750°C un pico correspondiente a la portlandita que como ya se mencionó anteriormente, se formó durante la etapa de enfriamiento y por tal motivo es menos cristalino, es por esta razón que no se puede apreciar en el difractograma en el mismo ángulo 2 $\theta$ .

### Microscopía electrónica de barrido (MEB-retrodispersados)

La figura 8 muestra las imágenes del análisis MEB del espécimen CPC100 después de someterse a las diferentes temperaturas críticas. Es posible observar que a medida que la temperatura de exposición aumenta, la degradación de la microestructura del espécimen de concreto aumenta.<sup>19</sup> La muestra inicial presenta pocos huecos y existe una buena adherencia entre la pasta de cemento y los agregados. A medida que la temperatura se aumenta como se muestra en la figura 8 (a) comienza la aparición de grietas en la zona de la interface pasta-agregado, contracción de la pasta de cemento y una mayor cantidad de huecos producto de la deshidratación de la pasta. El espesor de la grieta localizada en la interface pasta-agregado tiene un promedio de 1.2  $\mu\text{m}$ . La pasta de cemento en la figura 8 (b) y figura 8 (c) se puede apreciar con mayor deterioro y un espesor de grieta en la interface pasta-agregado que se incrementa a medida que la temperatura de exposición aumenta con valores promedio de 5.42  $\mu\text{m}$  y 7.16  $\mu\text{m}$  respectivamente. El gran deterioro que presenta la muestra sometida a 750°C puede relacionarse con la pérdida de peso y reducción en la velocidad de ultrasonidos que a esta temperatura se incrementó considerablemente. Estos resultados están en acuerdo con el estudio realizado por Peng y colaboradores en el cual se menciona que la descomposición del gel CSH se vuelve significativa por encima de 600°C y la relación de descomposición se incrementa considerablemente con el incremento en la temperatura.<sup>21, 24</sup> En la figura 9 (a) se muestra como la aparición de grietas comienza en la interface pasta-agregado y en la pasta de cemento, además del aumento en la cantidad de huecos. El espesor de la grieta localizada en la interface pasta-agregado fue de 10.21  $\mu\text{m}$

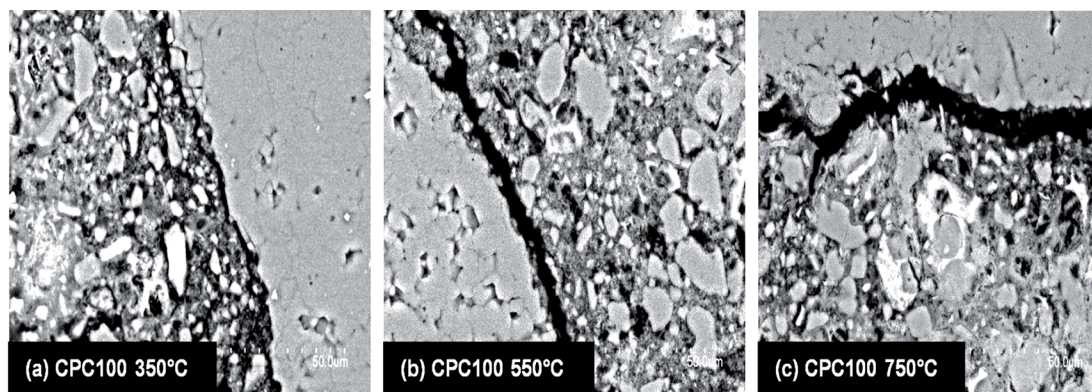


Fig 8. MEB espécimen CPC100 sometido a diferentes temperaturas críticas.

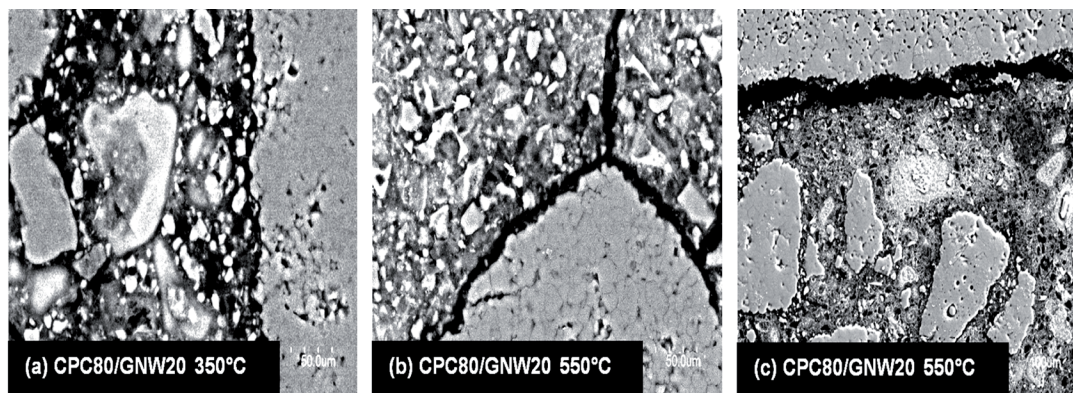


Fig 9. MEB espécimen CPC80/NSG20 sometido a diferentes temperaturas críticas.

promedio. Cuando la temperatura de exposición alcanzó 550°C como se muestra en la figura 9 (b), el deterioro de la pasta se incrementó en comparación a la muestra CPC100, el espesor de la grieta localizada en la interface pasta-agregado tiene un promedio de 13.1  $\mu\text{m}$ . El deterioro de la microestructura de la muestra sometida a 750°C es mayor como puede observarse en la figura 9 (c), donde se aprecia la pasta de cemento deshidratada e incluso los agregados comienzan a desintegrarse. La cantidad de huecos en la pasta de cemento se incrementó en comparación con la muestra CPC100 y el espesor de las grietas localizadas en la interface pasta-agregado es de 16.6  $\mu\text{m}$  promedio.

## CONCLUSIONES

Esta investigación se enfocó en evaluar los procesos de degradación más relevantes que se producen a microescala en el concreto cuando es sometido a altas temperaturas, haciendo una comparación entre el concreto adicionado (residuo nanosílice geotérmica y humo de sílice) y el concreto sin adiciones, elaborado únicamente con cemento Portland compuesto (CPC).

La pérdida de peso de los especímenes expuesto a 350°C y 550°C fue relativamente baja, siendo significativa cuando la temperatura alcanzó los 750°C. La pérdida de peso fue mayor para los especímenes adicionados con NSG en comparación con el espécimen adicionado con HS y el espécimen de referencia, incrementándose dicha pérdida a medida que la temperatura de exposición aumentaba.

La velocidad de ultrasonidos disminuyó gradualmente con el incremento en la temperatura, esta reducción fue mayor para los especímenes adicionados en comparación con el espécimen de referencia, lo cual se atribuye a la matriz cementante más densa que producen las adiciones de NSG y HS.

En el análisis ATD, se encontró que la pérdida de peso de los especímenes iniciales después de 300°C, fue mayor para aquellos con adiciones en comparación con el espécimen de referencia. El perfil DTG de la muestra CPC100 y CPC80/NSG20 muestra picos relacionados a la portlandita y carbonato de calcio respectivamente, con menor intensidad y desplazados de la curva de referencia, lo que sugiere que estos se formaron durante la etapa de enfriamiento y son menos cristalinos, como se corrobora en el difractograma.

Las imágenes MEB permitieron observar como la microestructura del espécimen adicionado con NSG presenta una mayor degradación a medida que la temperatura se incrementa comparada con el espécimen de referencia. Esto pudo ser comprobado al medir el espesor de las grietas localizadas en la zona de la interface pasta-agregado.

## REFERENCIAS

1. Omer, A., "Effects of elevated temperatures on properties of concrete", *Fire Safety Journal*, 42 (2007) 516-522.
2. Cree, D., Green, M., Noumowe, A., "Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: A review", *Construction and Building Materials*, 45 (2013) 208-223.
3. Ali, B., Hasan, Z., "Effect of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high strength concrete after exposure to high temperatures", *Cement and Concrete Composites*, 30 (2008) 106-122.
4. Bahar, D., Oguzhan, K., "Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume", *Fire Safety Journal*, 45 (2010) 385-391.
5. Abdul, A., Shehu, I., Ismail, M., "Effect of cooling regime on the residual performance of high-volume palm oil fuel ash concrete exposed to high temperatures", *Construction and Building Materials*, 98 (2015) 875-883.
6. Juenger, M., Siddique, R., "Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete", *Cement and Concrete Research*, 78 (2015) 71-80.
7. Savva, A., Manita, P., Sideris, K., "Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates", *Cement and Concrete Composites*, 27 (2005) 239-248.
8. Yuksel, I., Siddique, R., Ozkan, O., "Influence of high temperatures on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement", *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 967-972.
9. Xu, Y., Wong, Y., Poon, C., Anson, M., "Impact of high temperatures on PFA concrete", *Cement and Concrete Research*, 31 (2001) 1065-1073.
10. Saad, M., Abo-El-Eneni, S., Hanna, G., "Effect of temperature on physical and mechanical properties of concrete containing silica fume", *Cement and Concrete Research*, 26 (1996) 669-675.
11. Xu, Y., Wong, Y., Poon, C., Anson, M., "Influence of PFA on cracking of concrete and cement paste after exposure to high temperatures", *Cement and Concrete Research*, 33 (2003) 2009-2016.
12. Hertz, K., "Danish investigations on silica fume concretes at elevated temperatures", *ACI Mater J*, 89 (1992) 345-347.
13. Morteza, B., Mazyar, B. and Farhad A., "Performance of nano-Silica modified high strength concrete at elevated temperatures", *Construction and Building Materials*, 68 (2014) 402-408.



14. Gómez, L., Escalante, J., Mendoza, G., “Geothermal silica as an alternative replacement material of Portland cement”, *Journal of Materials Science Letters*, 39 (2004) 4021-4025.
15. Puente, R., “Efecto de la adición del residuo nanosílice geotérmica sobre la durabilidad de morteros y concretos base cemento Portland”, Tesis Doctoral (2012).
16. Ali, E., Gokhan, K., Serhat, B.M. and Mohamed, Y., “The effect of cement dosage on mechanical properties of concrete exposed to high temperatures”, *Fire Safety Journal*, 55 (2013) 160-167.
17. Lin, W. and Lin, T., “Microstructure of fire damaged concrete”, *ACI Mater J*, 93 (1996) 199-205.
18. Mohd, S., Jagdish, P. and Amjad, M., “Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS”, *Construction and Building Materials*, 40 (2013) 944-950.
19. Saad, M., Abo-El-Enein, S., Hanna, G. and Kotkata, M., “Effect of silica fume on the phase composition and microstructure of thermally treated concrete”, *Cement and Concrete Research*, 26 (1996) 1479-1484.
20. Alonso, C. and Fernandez, L., “Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environment”, *Journal of material science*, 39 (2004) 3015-3024.
21. Fares, H., Remond, S., Noumove, A. and Cousture, A., “High temperature behavior of self-consolidating concrete, microstructure and physicochemical properties”, *Cement and Concrete Research*, 40 (2010) 488-496.
22. Alarcon, L., Platret, G., Massieu, E. and Ehrlicher, A., “The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste”, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 609-613.
23. Castellote, M., Alonso, M., Andrade, C., Turrillas, X. and Campo J., “Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction”, *Cement and Concrete Research*, 34 (2004) 1633-1644.
24. Peng, G., and Huang, Z., “Change in microstructure of hardened cement paste

